La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos

• Oscar Luis Palacios-Vélez* • Bernardo Samuel Escobar-Villagrán •
Colegio de Postgraduados, México
*Autor de correspondencia

Resumen

Palacios-Vélez, O. L., & Escobar-Villagrán, B. S. (marzo-abril, 2016). La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(2), 5-16.

Se discuten los supuestos básicos del "desarrollo sustentable" y se comentan algunos de los enormes retos que deberán afrontarse para alcanzar ese desarrollo. Sobre este punto se comenta un estudio realizado por el Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute de Boston (Great Transition. The Promise and Lure of the Times Ahead) en relación con tres escenarios posibles: a) escenario convencional, b) escenario catastrofista y c) escenario gran transición. Después se expone la necesidad e importancia de la agricultura de riego en la mayor parte del país, y se presenta un resumen de la infraestructura hidráulica construida hasta 2013. Se comentan también los principales retos a la que se enfrenta la agricultura de riego, como son: a) falta de una conciencia social sobre el valor real del agua tanto por parte de la autoridad como de los usuarios agrícolas y urbanos; b) alteraciones a la cantidad y calidad del escurrimiento de los ríos; c) sobreexplotación de acuíferos; d) ensalitramiento de los suelos; e) contaminación de acuíferos y cuerpos superficiales de agua, y f) conflictos entre el uso agrícola del agua, y los usos industrial y municipal. El empleo cada vez más intenso de las aguas subterráneas ha generado la sobreexplotación de muchos acuíferos, aunque es difícil evaluar de forma correcta el grado de sobreexplotación. Se exponen dos métodos para llevar a cabo esta evaluación: a) balance hidrológico y b) evolución de niveles de agua subterránea, tomando como ejemplo el acuífero de Texcoco. Por último, se dan algunas recomendaciones para enfrentar el problema de la sobreexplotación de acuíferos.

Palabras clave: desarrollo sustentable, agricultura de riego, sobreexplotación de acuíferos.

Abstract

Palacios-Vélez, O. L., & Escobar-Villagrán, B. S. (March-April, 2016). Sustainable Crop Irrigation and Overexploitation of Aquifers. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(2), 5-16.*

This article discusses the basic premises of "sustainable development" and mentions some of the enormous challenges that need to be addressed to achieve such development. A study by the Stockholm Environment Institute and the Tellus Institute of Boston (Great Transition. The Promise and Lure of the Times Ahead) presents three possible scenarios related to this topic: a) conventional, b) catastrophic and c) a "great transition." The need and importance of crop irrigation in the majority of regions in the country is then discussed, and the hydraulic infrastructure built up to 2013 is summarized. The main challenges involved in crop irrigation are also mentioned, including: a) lack of social awareness about the real value of water on the part of authorities as well as agricultural and urban users; b) changes in the amount and quality of runoff from rivers; c) overexploitation of aquifers, d) salinization of soils, e) contamination of aquifers and surface water bodies and f) conflicts between agricultural water users and industrial and municipal water. The increasingly intensified use of groundwater has resulted in an overexploitation of many aquifers, although it is difficult to correctly evaluate the degree of overexploitation. Two methods to evaluate this are presented —hydrological balance and evolution of groundwater levels— based on the example of the Texcoco aquifer. Lastly, some recommendations are presented to address the problem of overexploitation of aquifers.

***Keywords**: Sustainable development, crop irrigation, overexploitation of aquifers*

Publicado por invitación

Introducción

La agricultura en general y la agricultura de riego en particular son actividades que han cambiado de modo significativo el paisaje de nuestro planeta y alterado muchos de los delicados ecosistemas que existían antes del aceleramiento del desarrollo humano que ocurre en los últimos 200 a 250 años, periodo por completo insignificante, comparado con la edad estimada de la Tierra. Sin embargo, el desarrollo de las comunidades, comunicaciones, industria, y consiguiente generación de energía y agricultura, en particular la altamente tecnificada y de riego alcanzan un crecimiento de características exponenciales en los últimos 100 o 150 años, de los cuales los últimos decenios son los más preocupantes. Aparejado con este crecimiento exponencial, ha aparecido una serie de problemas que ponen en peligro tal crecimiento y requieren ser analizados con sumo cuidado. Uno de estos problemas se refiere a la sobreexplotación de acuíferos, que involucra tanto a usuarios agrícolas como industriales y urbanos.

La sobreexplotación de acuíferos es uno de los problemas que debe resolverse para alcanzar un "desarrollo sustentable", que se define como un desarrollo que permite satisfacer las necesidades de la presente generación, pero sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer de manera similar sus propias necesidades. El desarrollo sustentable debe ser *socialmente aceptable, económicamente viable y ambientalmente responsable*, aunque en sentido estricto no se sabe si estas tres condiciones pueden alcanzarse de forma simultánea. Este concepto se popularizó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo y el Ambiente, comúnmente conocida como Cumbre de Río de Janeiro, que tuvo lugar en 1992. La División para el Desarrollo Sustentable del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (http://www.un.org/esa/sustdev/documents/docs_sdissues.htm) lista 42 áreas de actividad requeridas para lograr este tipo de desarrollo. De manera similar, la llamada Agenda 21, una serie de propuestas hechas ante la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo en 1992 (http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21toc.htm), presenta acciones en 40 diferentes áreas o temas, que requieren atención para alcanzar tal tipo de desarrollo. Tal vez mencionar un elevado número de acciones a seguir complique las labores de seguimiento y evaluación. A nuestro parecer se deben destacar cuatro áreas de acción fundamentales: 1) erradicación de la pobreza; 2) conservación de los recursos naturales; 3) prevención y combate de la contaminación, y 4) combate del calentamiento global. A continuación se comentan de forma breve:

1. *Erradicación de la pobreza*. Parece haber un consenso en que para alcanzar un desarrollo sustentable se requerirá de la activa participación de *todos* los sectores de la sociedad, en particular de los más numerosos, que suelen ser los más pobres. Sin embargo, tal colaboración sólo se logrará si primero se reduce la enorme desigualdad social y económica que se da tanto entre países ricos y pobres como dentro de cada nación. El producto interno bruto *per cápita* en los países más ricos es de entre 30 000 y 100 000 dólares estadounidenses por habitante por año, cifra que para el caso de Luxemburgo rebasa los 100 000 dólares. En cambio, el ingreso correspondiente en las naciones más pobres no alcanza los 1 000 dólares por habitante y año; es decir, 30 o más veces menos (http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD). Además, dentro de cada país, las diferencias también son enormes y han venido aumentando año tras año. En México, al igual que en otros países de Latinoamérica, casi la mitad de la población vive en condiciones de pobreza o pobreza extrema. Obviamente, los que menos tienen sólo están pensando qué hacer para darle de comer a su familia. No es posible esperar que puedan preocuparse por el cuidado del ambiente, el calentamiento global o lo que

• ISSN 0187-8336

pueda pasar con las generaciones futuras. Pobreza y desigualdad social son entonces los principales obstáculos para el desarrollo sustentable.

2. *Conservación de los recursos naturales*. Esta acción es casi un sinónimo del desarrollo sustentable, pues su sobreexplotación y, más aún, su agotamiento, significaría una verdadera catástrofe para la humanidad. Es, pues, urgente hacer un uso cuidadoso, eficiente, muy bien planeado y supervisado de los recursos naturales, en particular del agua, suelo, recursos del subsuelo y biota. Por otro lado, el crecimiento demográfico que se ha tenido en los últimos 100 años, en particular en los países menos desarrollados, está ejerciendo una gran presión sobre los recursos naturales, por lo que es imperioso reducir este crecimiento.

3. *Prevención y combate de la contaminación*. Cada vez es más evidente que nos estamos ahogando en nuestros propios detritos, por lo que es apremiante prevenir y combatir la contaminación atmosférica, del agua y del suelo, algo que se dice con facilidad, pero que va a costar mucho esfuerzo de parte de toda la sociedad, pues involucra fuertes inversiones en la industria, agricultura, servicios municipales y transporte. El combate de la contaminación es una condición obligada para mejorar la salud humana y calidad de vida. No se puede concebir un verdadero desarrollo humano en un ambiente deteriorado y contaminado.

4. *Combate del calentamiento global*. Aunque se reconoce que la participación de los países en desarrollo en la emisión de gases con efecto de invernadero y en el calentamiento global es mucho menor que la de los países desarrollados, como Estados Unidos, China y Japón, así como en la Unión Europea, es indispensable incrementar nuestros esfuerzos para reducir el consumo de energéticos provenientes del petróleo y aumentar el uso de energías alternativas, como la eólica, solar, geotérmica y la obtenida de biomasa. Se debe tomar conciencia de que el petróleo se acabará más temprano que tarde, y, sobre todo, se irá haciendo cada vez más inaccesible. Por esta razón es urgente fomentar el uso de biocombustibles, aprovechando la experiencia de Brasil, país que ha logrado avances considerables en tal área. Esto contribuirá a disminuir la acumulación de gases con efecto de invernadero y a reducir el cambio climático global.

Para lograr una amplia participación de la sociedad es preciso crear conciencia ambiental. En este esfuerzo deben participar todos los que han tenido la oportunidad de compenetrarse en mayor o menor grado de estos problemas. Para ello hay que hacer uso de todos los medios disponibles que expliquen los peligros de la sobreexplotación de los recursos naturales, los riesgos de la contaminación y del calentamiento global para la supervivencia del hombre, y de las especies vegetales y animales. Es vital propiciar un cambio en los estilos de vida, a fin de ir sustituyendo los valores del consumismo e individualismo, por los valores del desarrollo cultural, artístico, intelectual y de solidaridad social hacia las clases menos favorecidas.

Aportaciones del Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute de Boston

Es normal que al meditar sobre los problemas del desarrollo sustentable nos preguntemos si seremos capaces de superar todos estos obstáculos y alcanzar un equilibrio ecológico que nos permita vivir de forma decorosa, sin poner en peligro las generaciones futuras o si nos iremos degradando con posibilidades de desaparecer como sociedad organizada. Hay grupos de investigadores de universidades e instituciones científicas que están tratando de responder a esta interrogante. Se puede mencionar, por ejemplo, el estudio realizado por el Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute de Boston, Massachusetts. Apoyado por estas instituciones, un grupo de investiga-

ISSN 0187-8336 •

dores, liderado por Paul Raskin (2002), elaboró un reporte intitulado "Great Transition: The Promise and Lure of the Times Ahead". En este estudio se consideran tres escenarios plausibles, denominados evolucionario, catastrófico y el que llaman "gran transición".

Según este estudio, los *evolucionistas* son optimistas. Piensan que los patrones dominantes observados hoy en día pueden traer prosperidad, estabilidad y salud ecológica sin mayores sorpresas ni discontinuidades agudas. Consideran que los ajustes incrementales en los mercados y políticas gubernamentales serán capaces de controlar los problemas sociales, económicos y ambientales.

Los *catastrofistas*, por su parte, temen que las tensiones sociales, económicas y ambientales no se van a resolver, con consecuencias terribles para el futuro del mundo, que se subdividirá en dos estratos antagónicos: unos pocos enclaves amurallados para las élites privilegiadas, y amplios sectores caóticos y anárquicos para las mayorías pauperizadas.

Por último, los seguidores de la *gran transición* comparten estos temores, pero creen que con la activa participación, principalmente de los jóvenes y las organizaciones no gubernamentales (ONG), haciendo amplio uso de las redes sociales y las nuevas tecnologías de la información, serán capaces de influir sobre la forma de actuar de los gobiernos y de las grandes corporaciones hasta lograr los cambios y transformaciones requeridas para renovar la sociedad, y alcanzar un desarrollo que sea sustentable. Sin embargo, esta situación sólo se logra después de una profunda crisis global, que suponen tendría lugar hacia el año 2015 (estudio hecho en 2002).

Estos escenarios representan tres mundos posibles: uno de ajustes incrementales; otro de cataclismos, y uno más de cambios estructurales y renovación.

La agricultura de riego

El análisis de los problemas de la sustentabilidad puede hacerse por sectores de la actividad humana. Uno de los principales es la agricultura, en particular la de riego, que conlleva los impactos más fuertes sobre el ambiente. En el caso particular de México, el riego es indispensable o necesario en la mayor parte del país, que cuenta con una precipitación pluvial media anual del orden de 772 mm. Sin embargo, y como suele suceder, el agua que se precipita no está distribuida espacialmente de manera homogénea en el territorio nacional; existen amplias regiones con precipitación media anual de menos de 200 mm en el noroeste del país y zonas con más de 3 000 mm en el sureste. También hay amplias fluctuaciones temporales con periodos de estiaje prácticamente sin lluvias y regiones con precipitaciones mensuales del orden de 500 mm. Estas condiciones naturales han propiciado el avance de la irrigación en la medida que el crecimiento poblacional y el desarrollo económico han elevado la demanda de productos agrícolas. Aunque en el país existen regiones donde la agricultura de temporal es exitosa, se estima que en general la agricultura de riego en cultivos como maíz grano, sorgo grano, trigo y frijol es de 2 a 3 veces más productiva que la de temporal. Un dato más revelador de la importancia de la agricultura de riego es que en 2014, el valor total de la producción agrícola se estimaba en $238 559 104.00 de los cuales 64% ($152 310 412.00) correspondía a la producción bajo riego y tan sólo 36% ($86 248 692.00) eran de agricultura de temporal. Debe agregarse que la superficie cosechada de riego ese año fue de 4 119 605 ha, mientras que la superficie cosechada de temporal fue de 10 980 356 ha (http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado). Esto explica el acelerado desarrollo que tuvo la irrigación en nuestro país desde la fundación de la Comisión Nacional de Irrigación en 1926 y la creación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1947. Las cifras marcan la importancia por cuidar el potencial productivo de las tierras de riego y mejorar la eficiencia en el uso del agua, lo cual permitiría incrementar la superficie de riego y la producción de cultivos, pues el aumento de la población y la urgencia de elevar su poder adquisitivo continuarán extendiendo la deman-

• ISSN 0187-8336

da de todo tipo de productos agrícolas. En el cuadro 1 se presenta un resumen de la principal infraestructura hidráulica construida para los diferentes usuarios nacionales hasta el año 2013.

Retos que enfrenta la agricultura de riego

Para lograr una agricultura de riego sustentable tendrá que afrontarse una serie de retos, entre los cuales se pueden destacar los siguientes:

a) *Falta de conciencia social sobre el valor real del agua*. El primer problema que enfrenta la política hidráulica en México es la falta de conciencia social sobre el valor real del agua tanto por parte de la autoridad como de los usuarios agrícolas y urbanos, lo que se manifiesta en un uso ineficiente, muchas veces descuidado, de este recurso.

b) *Sistemas de riego gravitacional, y alteraciones a la cantidad y calidad del escurrimiento de los ríos*. Los sistemas de riego gravitacional de las zonas áridas y semiáridas tienen como finalidad captar, almacenar, conducir y distribuir agua de lluvia, llevándola a los campos de cultivo para complementar los requerimientos hídricos de los cultivos, y así posibilitar o mejorar sus rendimientos. Los sistemas de riego, por lo general, comprenden una presa y su respectivo embalse en un área topográficamente adecuada sobre el cauce de un río, así como un sistema de canales y estructuras hidráulicas requeridas para su operación. Complementan al sistema de riego los sistemas de drenaje, que incluyen los drenes parcelarios, algunos de tubería plástica enterrada, así como drenes colectores de diversa jerarquía, que entregan las aguas residuales a un cuerpo receptor, que puede ser el océano, lago interno o el mismo río. Desde el punto de vista ambiental, una característica muy importante a considerar es que las aguas de drenaje siempre tienen un contenido de sales solubles superior al de las aguas originales del río debido a que los procesos evapotranspirativos de los cultivos utilizan agua, pero dejan las sales solubles en las aguas residuales que van hacia el manto freático, y los acuíferos o drenes. Estas aguas residuales también contienen residuos de diferentes agroquímicos que se emplean en la agricultura moderna. Todo esto significa que los ríos cuyas aguas son utilizadas en menor o mayor grado para el riego, después de estos aprovechamientos terminan con menos agua y de peor calidad si en el río se reciben las descargas de los drenes del sistema de riego. Esta situación puede empeorar de modo dramático si en el mismo río se tiene una cascada de sistemas

Cuadro 1. Infraestructura hidráulica construida en México hasta 2013.

Infraestructura hidráulica **5,163 presas y bordos de almacenamiento, con una capacidad total de almacenamiento de alrededor de 150 km^3, equivalentes a 10% de la precipitación anual**	
Infraestructura agrícola	**Infraestructura urbana**
6.4 millones de hectáreas de riego, de las cuales 3.4 millones de hectáreas corresponden a 85 distritos de riego y 3 millones de hectáreas a más de 39 000 a pequeñas "unidades de riego".	742 plantas potabilizadoras en operación.
Un volumen de agua de 62 km^3/año es usado en la irrigación y de este volumen, 21 km^3/año se extrae de acuíferos.	2 287 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación y 2 617 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación; 3 000 km de acueductos.

Fuente: Semarnat-Conagua, 2014.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 5-16

ISSN 0187-8336 •

de riego, algo que empieza a observarse con mayor frecuencia en la medida que se ha desarrollado la agricultura de riego en los últimos 100 años.

Los sistemas de riego son tan antiguos como la humanidad misma. Algunos realmente viejos siguen en operación, como el sistema del río Nilo en Egipto; pero muchos otros han desaparecido, como en Mesopotamia y la antigua Persia. Otros más están con grandes problemas o en vías de extinción después de haber provocado catástrofes ecológicas sin precedentes. Es de especial interés para las audiencias de especialistas en riego conocer estas experiencias, a fin de crear conciencia de los peligros del riego y uso desmedido de agroquímicos, y para tratar de prevenir tragedias similares.

El caso más dramático de catástrofe ecológica de un proyecto de riego es el acaecido en el sistema de riego de los ríos Amu Darya y Syr Darya, que desembocan en un gran lago llamado mar de Aral, por sus grandes dimensiones originales. Estos ríos irrigan tierras en las exrepúblicas soviéticas de Tadzhikistán, Kyrguistán, Uzbequistán, Turkmenistán y Kazajstán. Las obras de riego empezaron a construirse en la década de 1930, pero tuvieron un repunte importante en el decenio de 1960, cuando las autoridades soviéticas decidieron incrementar sustancialmente la producción algodonera, para surtir la creciente demanda interna y exportar. Como se sabe, este cultivo requiere de grandes láminas de riego y además demanda del uso de muchos agroquímicos, como fertilizantes, insecticidas, pesticidas y herbicidas. Este incremento en la irrigación trajo consigo una fuerte disminución de los escurrimientos que llegaban al mar de Aral, como consecuencia se redujo el área y volumen del lago. Hay que agregar que los bajos volúmenes de escurrimiento tenían un mayor contenido de sales solubles y residuos de peligrosos agroquímicos, por lo que el mar no sólo se redujo, sino que la calidad de su agua empeoró, para perjuicio de la pesca y salud de la población. Los daños fueron realmente incalculables, no sólo en términos económicos sino sociales y políticos. Mucho se ha escrito últimamente sobre este problema y se han mencionado varios cursos de acción para mitigar los daños, pero una característica común es que todos requieren de grandes inversiones y mucho tiempo. Baste señalar que en enero de 1994, las repúblicas de Kazajstán, Uzbequistán, Turkmenistán, Tadzhikistán y Kyrguistán firmaron un pacto para dedicar 1% de sus presupuestos en ayudar a restaurar los daños hechos. Para 2006, los proyectos de restauración del Banco Mundial, en especial en la parte norte del lago, estaban dando lugar a ciertas mejoras, logrando un inesperado alivio para lo que había sido un cuadro pesimista en extremo (http://www.answers.com/aral+sea?cat=travel&gwp=11&method=3&ver=2.3.0.609). En México, esto debe servir como advertencia de lo que puede suceder con los lagos de Chapala, Cuitzeo y Pátzcuaro, que han visto disminuir la cantidad y calidad de los escurrimientos que les llegaban, y que ahora están contaminados con agua residual tanto urbana como agrícola e industrial.

c) *Sistemas de riego por bombeo y sobreexplotación de acuíferos*. Como se señaló, de toda el agua empleada en la agricultura de riego de nuestro país (unos 62 km^3), una tercera parte (21 km^3) proviene del subsuelo. La Comisión Nacional del Agua (Conagua) ha identificado y delimitado 653 acuíferos, habiendo evaluado y publicado en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) la disponibilidad de agua en 2013 y resultando que 106 de ellos están sobreexplotados; es decir, se extrae más agua que la recarga media estimada, por lo que los niveles piezométricos se vienen abatiendo año con año. Esto es, el régimen de extracciones no puede perdurar de manera indefinida, lo cual hace necesaria una profundización o reubicación de los pozos de bombeo. La situación es verdaderamente crítica en el Valle de México,

• ISSN 0187-8336

en estados como Querétaro, Guanajuato y Aguascalientes —donde el agua se utiliza de modo preferente para fines municipales e industriales—, al igual que en Sonora y Baja California Sur. El problema que se tiene para el desarrollo sustentable es que "algunos expertos opinan que para mantener la seguridad alimentaria se necesitará un incremento del 15 al 20 por ciento en la extracción de agua hasta el año 2025 [mientras que, por otro lado] algunos ambientalistas opinan que para preservar los ya estresados recursos hídricos, las extracciones deberían reducirse por lo menos en un diez por ciento durante el mismo periodo" (Castro *et al*., 2006). Dado que muchos de los acuíferos sobreexplotados son una fuente importante, o la única fuente, de abastecimiento de agua a poblaciones, la solución no puede consistir solamente en eliminar los subsidios al costo del agua, así como de la energía utilizada para el bombeo y dejar que las fuerzas del mercado vayan descartando a los usuarios que obtienen menos beneficios por metro cúbico de agua utilizada. Sin embargo, el aumento de las cuotas por el servicio de agua tanto a usuarios agrícolas como domésticos (más que los usuarios industriales, que ya tienen cuotas mucho más elevadas) es un imperativo que la sociedad debe afrontar ya.

d) *Riego y ensalitramiento de los suelos*. Probablemente el mayor peligro que corren los suelos irrigados de zonas áridas y semiáridas es la acumulación de sales solubles, que trae como consecuencia una disminución de los rendimientos de la mayoría de los cultivos. El proceso de acumulación es bien conocido: el agua de riego, en particular cuando se utilizan aguas subterráneas, que suelen tener un mayor contenido de sales solubles que las aguas de corrientes superficiales, es usada en los procesos evapotranspirativos de los cultivos, pero las sales en solución tienden a acumularse en las capas superficiales de los suelos. La escasa lluvia que se presenta en las zonas áridas y semiáridas, así como las láminas de "sobre-riego" que en ocasiones se adicionan al riego pueden lixiviar esas sales solubles hacia el subsuelo; pero si los niveles freáticos se mantienen cercanos a la superficie del suelo (sobre todo a menos de 1.5 m de profundidad), las sales solubles regresan a las capas superiores por ascensos capilares. El drenaje agrícola de las zonas de riego tiene como finalidad mantener abatidos los niveles freáticos, para evitar o disminuir los ascensos capilares de aguas freáticas salinas y prevenir de esta manera el ensalitramiento de los suelos. Sin embargo, en México, por diversas razones económicas y falta de apreciación de los beneficios del drenaje, sólo alrededor de 1% de la superficie de riego cuenta con drenaje subterráneo entubado. Debe hacerse notar que el drenaje colector existente, en forma de grandes zanjas con espaciamiento promedio de alrededor de 1 km, al que en principio deberían descargar los drenes parcelarios, también tiene un efecto en el abatimiento de los niveles freáticos y el control de la salinidad, pero su gran espaciamiento y su frecuente mal estado de conservación hacen que su acción desalinizadora sea limitada.

e) *Sistemas de riego y contaminación de acuíferos y cuerpos superficiales de agua*. Es prácticamente imposible evitar que una parte de las láminas aplicadas para riego se percole hasta los mantos freáticos, incluso en riego por goteo. Además, el agua percolada siempre contendrá sales solubles y residuos de los diversos agroquímicos que se utilizan en la agricultura, en particular residuos de fertilizantes nitrogenados, que suelen utilizarse en cantidades mucho mayores que otros agroquímicos. Las aguas percoladas pueden seguir dos caminos principales: salir por los sistemas de drenaje existente hacia los cuerpos de agua receptores de los efluentes de drenaje o percolarse hasta los acuíferos. Los sistemas de drenaje sólo son el conducto por el cual sales solubles y los residuos de agroquímicos llegan a los cuerpos de agua, contaminándolos. Este tipo de contaminación es diferente de la

ISSN 0187-8336 •

contaminación que ocasionan las aguas de drenaje urbano e industrial. Es también menos impactante a la vista (y al olfato), pero puede tener consecuencias catastróficas para el ambiente, como ha sido el caso de la contaminación del mar de Aral. Otro efecto negativo para el ambiente lo producen los fertilizantes nitrogenados, pues propician el desarrollo de algas en los cuerpos de agua, lo que a su vez enturbia y deteriora de varias formas el agua, lo que altera la vida acuática natural. Estos problemas los provoca no sólo el drenaje de zonas de riego, sino en general todo el drenaje agrícola, a través del cual los fertilizantes contenidos en sus aguas alcanzan ríos y lagos. En todos los países avanzados se están combatiendo estos problemas para regresar a los cuerpos de agua al estado que tenían antes de que se desarrollara exponencialmente el uso de fertilizantes a partir de la segunda mitad del siglo pasado. Otra parte del agua que se percola a los mantos freáticos no sale por los sistemas de drenaje, sino que continúa su camino de descenso hasta llegar a los acuíferos. Como se sabe, muchos sistemas de abastecimiento de agua utilizan aguas subterráneas, las cuales pueden estar contaminadas por residuos de agroquímicos, lo cual puede tener consecuencias en la salud humana y de los animales.

f) *Conflictos entre el uso agrícola del agua, y los usos industrial y municipal*. La agricultura de riego suele ser el usuario más importante de los recursos hídricos, aunque en varias zonas metropolitanas de nuestro país los sectores urbano e industrial ya sean más importantes que el sector agrícola. Con el crecimiento poblacional y el desarrollo de la economía se han agudizado en muchas partes los conflictos por el uso de los escasos recursos hídricos. En esta lucha, a la larga el sector agrícola tendrá que aumentar de forma considerable la eficiencia del manejo y deberá reducir el consumo de agua en beneficio de los usuarios domésticos e industriales, que de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (2013) tienen prioridad sobre los usuarios agrícolas. Estos ajustes demandarán fuertes inversiones para modernizar y tecnificar los sistemas de riego (y también los sistemas de abastecimiento de agua potable). Se debe reconocer que entre las medidas necesarias que tarde o temprano necesitarán tomarse, un lugar preponderante lo tendrá un necesario aumento en las tarifas que requieren pagarse por el servicio de riego, en particular cuando es por bombeo, así como por el servicio de agua potable. No existe mejor incentivo para manejar con más cuidado y eficiencia el agua que una tarifa que desanime el desperdicio.

Riego por gravedad y riego por bombeo

Al inicio, la agricultura de riego se desarrolló derivando agua directamente de los ríos. Después se construyeron sistemas de riego cada vez más complejos, formados por presas de almacenamiento, derivadoras y redes de canales para distribución de agua a las parcelas. Sin embargo, a medida que el agua de escurrimientos superficiales empezaba a escasear, se recurrió al bombeo de las aguas subterráneas. El costo de explotación del agua bombeada para la agricultura es superior al del agua derivada de ríos o presas, pues, por un lado, deben pagarse más derechos por el uso del agua subterránea que por el uso de agua superficial, según lo establece la Ley Federal de Derechos (2014). Sin embargo, lo que encarece más al agua subterránea son los costos del bombeo, los cuales dependen tanto del costo de la energía como de la profundidad de bombeo. Al respecto, en la actualidad hay regiones sobreexplotadas, como el Valle de México, el Bajío, y algunas áreas agrícolas del norte y noroeste del país, donde se tienen profundidades de bombeo que llegan a superar los 200 m. Davis y DeWiest (1966) señalan que el aprovechamiento del agua subterránea tiene grandes ventajas sobre los recursos superficiales, pues el agua subterránea presenta una composición química menos variable en el tiempo y los volúmenes almacenados en el subsuelo por

• ISSN 0187-8336

lo general son mayores que los superficiales y su aprovechamiento es más fácil, al evitar largas conducciones y disponer de ella de inmediato. Se puede agregar también que ante el problema actual de contaminación, las aguas superficiales están más expuestas a este riesgo, que implicaría un costo adicional de tratamiento y conducción para su uso; por tal motivo, sigue siendo más económico extraer agua del subsuelo con menos impurezas para su uso, que no requiere de una inversión para su tratamiento.

Sin embargo, el riego que depende del agua subterránea se enfrenta a problemas crecientes debido a la sobreexplotación de los acuíferos. La presión sobre los acuíferos se ha incrementado debido a que, además de la extracción excesiva, los volúmenes de recarga por infiltración se han venido reduciendo a consecuencia de la deforestación y cambios de uso del suelo. Desde 1975 ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados: 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001 y 106 en 2013 (Semarnat-Conagua, 2014). Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea del país se está minando a un ritmo de casi 6 km^3/año. A escala nacional, se estima que la recarga de los acuíferos es del orden de 77 km^3/año, de los cuales se calculan extracciones de 25.7 km^3/año, por lo que éstas equivalen a cerca de 33.3% de la recarga. Empero, tal cifra, que aparenta un balance positivo, es un promedio nacional que no revela la crítica situación que prevalece en algunos acuíferos de las regiones áridas, donde el balance es negativo. Entre los acuíferos sobreexplotados más importantes se pueden mencionar los de la Región Lagunera en el estado de Coahuila; los de Costa de Hermosillo, Guaymas y Caborca en el estado de Sonora; los de Celaya e Irapuato, en el estado de Guanajuato, así como los acuíferos del Valle de México.

Incertidumbre sobre la magnitud de la sobreexplotación: caso "acuífero Texcoco"

El primer problema que se tiene para combatir la sobreexplotación de los acuíferos es la gran incertidumbre en la estimación de los valores de los componentes del balance hidrológico y las características geohidrológicas de los acuíferos, a partir de las cuales se calculan los flujos subterráneos de entrada y salida de agua. Los problemas que se presentan para estimar la sobreexplotación de un acuífero se pueden ilustrar con el caso particular del acuífero Texcoco. Este acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua de 12 municipios de la parte oriental del Valle de México, con una población cercana a un millón y medio de habitantes. El desarrollo económico de esta región depende fuertemente de la posibilidad de alcanzar un manejo sustentable del acuífero. El conocimiento de un valor confiable de la sobreexplotación es completamente indispensable para poder elaborar e implementar un plan de manejo sustentable del acuífero (Escobar & Palacios, 2012).

Las cifras publicadas en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) en 2003 y 2009 (figura 1) muestran la gran incertidumbre que tienen los valores calculados de la recarga y extracciones en los acuíferos del Valle de México.

Así, este acuífero era en 2003 el más sobreexplotado de los 14 acuíferos del Valle de México, en donde la extracción de agua subterránea se estimaba nueve veces superior a la recarga. Sin embargo, en un estudio posterior llevado a cabo en 2007 (publicado en el DOF en 2009), la extracción se estimó mayor a la recarga en menos de 15%. Debe destacarse que esta enorme diferencia en las extracciones reportadas se debe en buena medida a que tanto el municipio de Ecatepec como la Delegación Iztapalapa, donde se extraen más de 300 hm^3/año, fueron reasignados del acuífero Texcoco a otros acuíferos vecinos. Se entiende menos el enorme aumento en la estimación de la recarga (de 49 hm^3/año en 2003, a 161 hm^3/año en 2007), ya que en este periodo no se han realizados trabajos significativos de recarga y las diferencias en estas cantidades se pueden deber más a la forma de determinarlas, ya que:

a) El cálculo de la evapotranspiración real, que se resta de la precipitación atmosférica para

ISSN 0187-8336 •

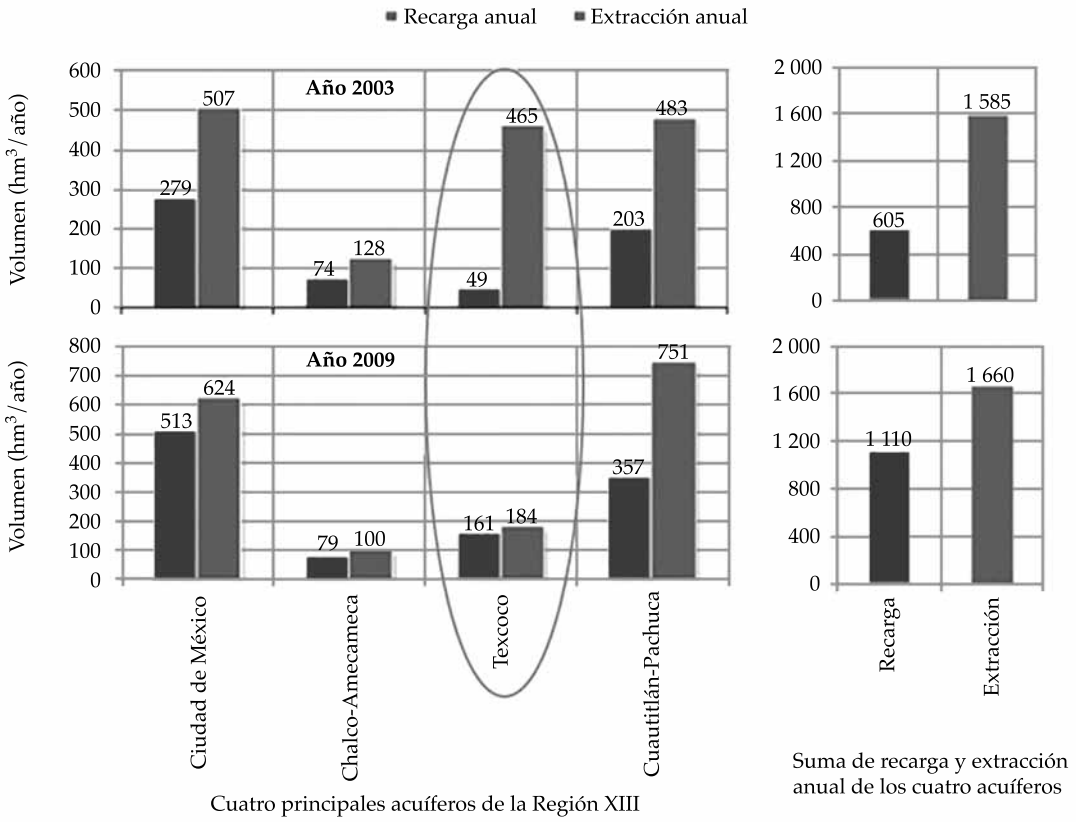

Figura 1. Comparación de la extracción y recarga de los principales acuíferos del Valle de México.

evaluar la recarga vertical, por lo general se determina mediante métodos poco precisos, como el método de Turc (Conagua, 2006). Debe agregarse que el empleo de métodos más precisos, como el de Penman-Monteith, se dificulta por la falta de la información requerida.

b) El cálculo de los flujos subterráneos mediante la ecuación de Darcy requiere del conocimiento del gradiente del potencial en las fronteras del acuífero y de la transmisividad, ninguno de los cuales se conoce de manera confiable.

c) El cálculo del volumen extraído se basa en un padrón incompleto y desactualizado de los pozos de bombeo, sin que se tenga una idea real de la cantidad de pozos clandestinos.

d) Con frecuencia no se tienen aforos de corrientes superficiales que permitan calcular tanto las entradas como salidas de agua superficial.

Métodos para evaluar el grado de sobreexplotación de un acuífero

La cuantificación del grado de sobreexplotación se puede determinar mediante dos enfoques (Escobar & Palacios, 2012):

a) El primer enfoque se basa en el estudio del balance hídrico del acuífero, de acuerdo con la ecuación general:

$$E - S = \Delta A \qquad (1)$$

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 5-16
• ISSN 0187-8336

donde:
E = entradas totales de agua al acuífero.
S = salidas totales de agua del acuífero.
ΔA = cambio de almacenamiento (sobreexplotación cuando $S > E$).

Por su parte:

$$E = \Delta P + E_{sub} + P_{RR} + P_{RDA} \quad (2)$$

donde:
ΔP = parte de la precipitación que se infiltra.
E_{sub} = entradas laterales de agua subterránea.
P_{RR} = pérdidas por infiltración en la red de riego.
P_{RDA} = pérdidas por infiltración en la red de agua potable.

$$S = B + S_{sub} + S_{sup} \quad (3)$$

donde:
B = extracciones de agua por bombeo.
S_{sub} = salidas laterales de agua subterránea.
S_{sup} = salidas por escurrimientos superficiales.

La sobreexplotación se presenta cuando se tienen más salidas de agua que entradas. Desafortunadamente, los componentes del balance hidrológico, exceptuando la precipitación atmosférica, suelen presentar muchos problemas en su medición o cálculo, en particular por la escasez y dudosa calidad de la información disponible. Además, para poder calcular las entradas y salidas subterráneas, se requiere del conocimiento de la transmisibilidad y sus variaciones en el acuífero, así como los niveles de agua en la periferia, para poder determinar gradientes y hacer cálculos de los flujos mediante la ley Darcy.

b) El segundo enfoque está basado en el análisis de la evolución de los niveles de agua del acuífero de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\Delta A = \pm \sum_{i=1}^{na} a_i h_i S_i \quad (4)$$

donde:
ΔA = cambio de almacenamiento (sobreexplotación cuando ΔA es negativo).
a_i = área asignada al i-ésimo sitio de observación.
h_i = evolución media o variación de la carga hidráulica en el pozo i.
S_i = coeficiente de almacenamiento.
na = número de elementos en que se divide el área de acuífero.

Si la tendencia de los datos de los niveles de agua es negativa, representa claramente el abatimiento del acuífero a través del tiempo. Para poder utilizar este método debe contarse con una red de pozos y piezómetros de observación de niveles de carga hidráulica y la realización de pruebas de bombeo para determinar el coeficiente de almacenamiento del acuífero. Para mayor información, véase Conagua (2007), y Escobar y Palacios (2012).

Posibles soluciones al problema de la sobreexplotación de acuíferos

A continuación se enlista una serie de medidas, clasificadas en estudios técnicos y acciones operativas, que pueden servir de base para elaborar un plan de manejo sustentable de un acuífero.

Estudios técnicos

- Actualización del censo de pozos de bombeo.
- Estimación de los volúmenes extraídos de los pozos clandestinos a partir de los datos sobre consumo de energía eléctrica.
- Estudios de los componentes del balance hidrológico.
- Establecimiento de una red de pozos y piezómetros de observación de niveles de carga hidráulica que se extienda hasta las fronteras del acuífero.
- Pruebas de bombeo para determinar la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

ISSN 0187-8336

Acciones operativas

- Promover la formación de un Comité Técnico de Aguas Subterráneas que se encargue del manejo del acuífero, incluyendo la identificación y cancelación de pozos clandestinos, así como vigilar que las extracciones no rebasen el volumen concesionado.
- Fomentar una cultura de pago por los servicios de agua tanto en ciudades como en zonas de riego.
- Reducción de los subsidios a los servicios de agua de riego y de abastecimiento urbano, así como de los subsidios al consumo de energía para el bombeo de agua.
- Obras de recarga artificial de acuíferos (reforestación, lagunas de recarga, pozos de absorción).
- Fomentar la captación y uso de agua de lluvia para consumo doméstico y agricultura de traspatio.

Referencias

Castro, J. E., Torregrosa-Armentia, M. L., Alle, A., Gómez-González-Cosío R., Vera, J., & Kloster, K. (2006). *Desarrollo institucional y procesos políticos*. IV Foro Mundial del Agua, México, D.F., marzo de 2006.

Conagua (2007). *Apoyo Técnico para la Actualización de la Disponibilidad del Acuífero Texcoco*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2006). *Estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Davis, S. N., & DeWiest, R. J. (1966). *Hydrogeology*. New York: John Wiley.

Diario Oficial de la Federación (28 de agosto de 2009). Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuíferos.

Diario Oficial de la Federación (20 de diciembre de 2013). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.

Diario Oficial de la Federación (31 de enero de 2003). Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual y sus planos de localización.

Escobar-Villagrán, B. S., & Palacios-Vélez, O. L. (abril-junio de 2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *3*(2), 67-84.

http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD.

http://www.answers.com/aral+sea?cat=travel&gwp=11&method=3&ver=2.3.0.609.

http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado.

http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21toc.htm.

http://www.un.org/esa/sustdev/documents/docs_sdissues.htm.

Ley de Aguas Nacionales (2013). Última reforma publicada. *Diario Oficial de la Federación* 07-06-2013.

Ley Federal de Derechos (2014). *Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Raskin, P., Banuri, T., Gallopín, G., Gutman, P., Hammond, A., Kates, R., & Swart, R. (2002). *Great Transition: The Promise and Lure of the Times Ahead* (110 pp.). Boston, USA: Stockholm Environment Institute and Tellus Institute. Recuperado de http://www.tellus.org/.

Semarnat-Conagua (2014). *Estadísticas del Agua en México 2014*. México, DF: Semarnat, Conagua.

Dirección institucional de los autores

Dr. Oscar Luis Palacios-Vélez
Dr. Bernardo Samuel Escobar-Villagrán

Colegio de Postgraduados
Campus Montecillo, Km 36.5
56230 Carretera México-Texcoco, Estado de México, México
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1173
opalacio@colpos.mx
esamuel@colpos.mx

• ISSN 0187-8336